

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420160

研究課題名(和文) 圧密化固体バイオマス燃料の新規燃焼利用方式の開発

研究課題名(英文) Development of new combustion method of densified solid biomass fuel

研究代表者

伊東 弘行 (Ito, Hiroyuki)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：30372270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：任意の形状に揃えて製造できるバイオマスブリケットの特長を活かし、柱状ブリケットの一端面に燃焼域を形成し一次的に進行させる燃焼方式の実現性について検討した。燃焼実験の結果、円筒ブリケットでは質量減少速度がほぼ一定となる条件のあることがわかった。この場合に、ブリケット外周下方および先端部に火炎が形成され、火炎下流側(上方)に赤熱して表面燃焼するチャー燃焼部が長く伸びた形態で燃焼する様子が観察された。ブリケット密度1100、1300 kg/m<sup>3</sup>ともに、周囲空気流速が大きい場合および小さい場合に質量減少速度および燃焼効率が低下し、それぞれピークを示す空気流量のあることが確認された。

研究成果の概要(英文)：A possibility of the new combustion method in which combustion region is formed at one end of a columnar briquette and propagates one dimensionally was investigated. As a result of the combustion experiments in the case with cylindrical briquette, it was confirmed that there is a condition in which the mass loss rate is almost constant. In the condition, it was observed that the flames are formed around the outer periphery at the lower part of the briquette and above the top end, and the long char combustion region was formed above the flame formed around the briquette. In the case of 1100 and 1300 kg/m<sup>3</sup> briquette density, both the mass loss rate and the combustion efficiency decreased with high and low air flow rate and, therefore, they have a peak at moderate air flow rate.

研究分野：熱工学

キーワード：端面燃焼 バイオマス ブリケット 円筒 質量減少速度

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化および化石燃料の枯渇問題から、バイオマスエネルギーの利用推進などによる化石燃料依存度の低減が期待されていた。バイオマスは、(1)燃料のエネルギー密度を高め貯蔵や輸送コストを低減するため、また(2)一度細かく粉碎した後に圧縮成型することで燃料の均質性を高めるため、圧密化されペレットやブリケットに加工される。これら固体燃料はガス化や液化工程に比べて処理が簡便であり、エネルギー効率やコストの面で有利であることから、利用促進が期待されるが、固体バイオマス燃料の利用が広く進められない一つの要因として、燃焼炉運転時のハンドリングの悪さが考えられた。従来の固体燃料の燃焼方式では、ペレットやブリケットなどの燃料ブロックを火中に投入する量で燃焼量の制御を行っていた。この方式では、燃料投入時に燃焼炉の温度低下が生じ、また投入された燃料が着火した後の燃焼速度制御が困難であることから、燃焼負荷の時間変動をコントロールするのが困難であった。また急に消火することが困難であるなど、液体燃料や気体燃料に比べてハンドリングに劣っていた。バイオマスブリケットは、バイオマス材料を細かく粉碎した後圧縮成型するため比較的均質であると同時に、圧密化する際の条件を選ぶことにより任意の形状に揃えて製造できるという特徴を有する。従って、バイオマスをブリケット化することにより任意の形状で揃った燃料を入手することが出来るため、従来の石炭や薪、ペレットなどでは実現できなかった燃焼方式を模索できると考えられた。それは、柱状のブリケット端面に燃焼域を形成し一次的に燃焼を進行させる燃焼方式である。この燃焼方式を実現することにより、連続的な燃料の供給が可能になることで燃焼負荷変動の小さな燃焼制御が可能になるとともに、燃焼面が特定の位置に限定されることから消火の際の急冷却が容易となり、ハンドリングの向上を図ることが期待できる。本研究に先立ち、研究代表者らは、円柱状バイオマスブリケットの片端面を燃焼面とする燃焼実験を行い、定常燃焼を実現できる条件を調べた。実験では、燃料面に酸化剤として空気を対向流で与え、ある空気流速範囲において定常的な燃焼が継続可能であることを確認した。しかしながらこの燃焼方式では燃料表面で固定炭素分が表面燃焼するものの、バイオマスブリケットの大きな割合を占める揮発分は燃料表面近くに火炎を形成できないことから燃焼せずに排出されるという課題を有していた。

### 2. 研究の目的

上記の燃焼方式による実験から明らかとなった課題を踏まえ、本研究ではバイオマスブリケットの固定炭素分および揮発分を同時に燃焼し、燃焼を一次的に進行させることができる新規燃焼方式を提案した(図1)。す

なわち燃焼用空気を燃焼進行方向と逆方向から供給し、固定炭素分の表面燃焼およびバイオマス熱分解により放出される揮発分の気相燃焼を同時にさせつつ一次的に燃焼を進行させるものである。本研究で提案した燃焼方式はバイオマスブリケットの特長を活かした固体燃料の新しい燃焼方式であるため、その着火燃焼特性などを調べた研究は国内外を通してほとんど見られないものであった。このため本研究では、新規バイオマスブリケット燃焼方式の吹き消え限界、燃焼負荷や燃焼効率などの燃焼特性を調べ、本提案燃焼方式の実燃焼器への適用可能性を確認することを目的とした。

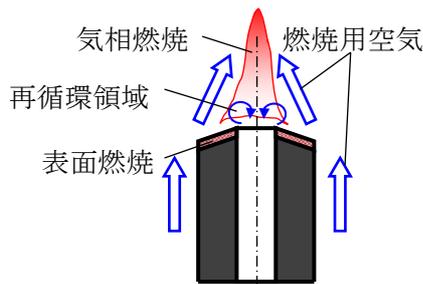


図1. 本研究で提案した燃焼方式

### 3. 研究の方法

本研究で提案したバイオマスブリケット燃焼方式の実燃焼器への適用可能性を確認するため、(1)バイオマスブリケット試作、(2)ブリケット熱拡散率へのブリケット密度の影響調査、(3)ブリケット燃焼実験、の三通りの実験を行った。

#### (1) 密度、寸法を変えたバイオマスブリケットの試作

本研究では、バイオマス試料として、島根県産ひのきのおがくずを使用し、バイオマスブリケット製造条件を確認するため、試作した。おがくず水分、プレス圧縮力および加熱温度の、ブリケット密度および水分への影響を確認した。ブリケット形状は、円柱(φ30mmx60mm)および円筒(φ35mmxφ18mm 長さ60mm、90mm および 120mm、φ40mmxφ26.5mmx60mm)について試作した。密度はそれぞれ1100kg/m<sup>3</sup>および1300kg/m<sup>3</sup>とした。

#### (2) バイオマスブリケットの熱拡散率へのブリケット密度の影響調査

ブリケット内部の熱移動へのブリケット密度の影響を調べた。図2に、本研究で使用したブリケット熱拡散率測定装置の概略を示す。バイオマスブリケット内部に熱電対を等間隔で埋め込み、所定の温度まで加熱した電気炉に急にブリケットを挿入し加熱する。加熱過程の一次元円柱の熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

で表される。この式を差分化し、各熱電対温度の時間変化を観察することで、見かけの熱拡散率： $a$  を算出し、水分および密度の影響を調べた。測定に際し、ブリケット外面に黒体スプレーを塗布した。

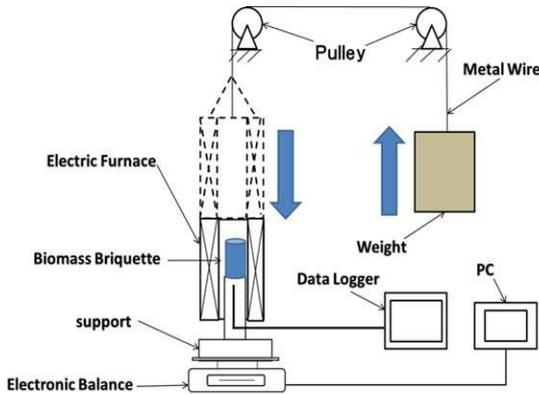


図 2. 熱拡散率測定実験装置概略

### (3)ブリケット燃焼実験

#### ①高温空気による着火

図 3 に本研究で使用した燃焼実験装置(高温空気着火)の概略を示す。燃焼炉はステンレス外管(φ216.3mm×φ208.3mm)とムライト内管(φ120mm×φ105mm)の二重管構造とし、両管間に断熱材を充填した。燃焼用空気はブロワで供給し、電気ヒータにて加熱後セラミックボールを用いて整流した。ブリケットは燃焼炉中心に設置したステンレス管の内部を通し燃焼炉下側からジャッキを用いて上昇させた。ステンレス管の外側には石英ガラス管を配置してステンレス管との間に冷却空気を供給することで高温空気供給時のブリケットの加熱を抑制した。ブリケット外周側へ供給する燃焼用空気 200 NL/min、冷却用空気は 10 NL/min とした。炉内供給空気温度はブリケット上流側に設置した K 型熱電対で測定し、ブリケットの表面温度はゲルマニウムガラスを介して IR カメラで撮影した。直接画像はビデオカメラで記録した。ジャッキの上に設置した電子天秤にてブリケットの質量減少を計測した。着火時はブリケットをステンレス管の上端面から 7 mm 露出させておき、高温空気を供給して加熱するとともに上部に赤熱させたニクロム線を設置して気相着火させた。気相着火後は空気加熱ヒータの電源を切り炉内空気流量を 400 NL/min、冷却空気を 0 NL/min としニクロム線を退避させ、4 mm/min、6 mm/min の 2 条件でブリケットを炉内に供給した。

#### ②室温空気中での着火

3-3 で述べた高温空気を用いたブリケットへの着火実験において、燃焼炉内へ未供給のブリケット部の熱分解が示唆されたため、室温空気および電熱器を用いた着火実験を行った。図 4 に、本研究で使用した室温空気中燃焼実験装置概略を示す。φ35mm×φ18mm 円筒ブリケットを供給ロッド上部に設置し、

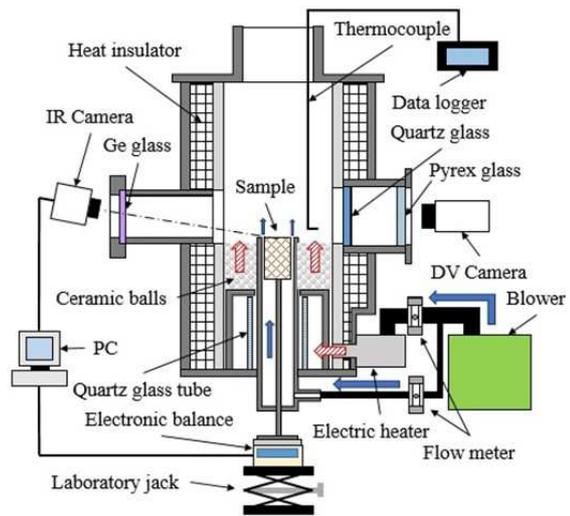


図 3. 燃焼実験装置概略 (高温空気着火)

内径φ39mmのステンレス製供給管を通してジャッキにて炉内へ供給する。燃焼炉は内径φ105mmのピアレックスガラスを用いた。ブリケット外周側およびブリケット内管内にブロワにて室温空気を供給した。着火にはニクロム線とセラミック碍子管にて構成した着火装置を用い、ブリケット上端に着火した。着火確認後、着火装置は炉外へ退避させた。ブリケット供給ロッドとジャッキの間に設置した電子天秤にて質量減少を測定した。燃焼の様子を DV カメラで撮影記録した。燃焼炉出口に設置した排ガス分析器(ホダカテスト HT-2700)にて O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO を、FID 式 VOC 分析計(SHIMADZU VMS-1000F)にて THC(CH<sub>4</sub>換算)を、またガスを採取してガスクロマトグラフにて N<sub>2</sub> を分析した。ガス濃度測定位置は、炉出口中央(R=0mm)、R=20mm、R=40mm の位置にて行なった。ブリケット内管空気流量を 2NL/min 一定とし、ブリケット外周側空気流量を 50~400NL/min とし実験を行った。

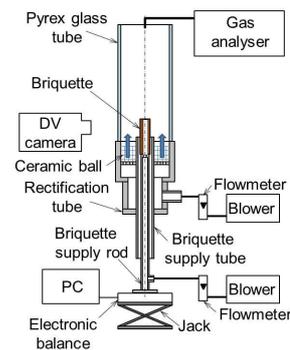


図 4. 燃焼実験装置概略 (室温空気着火)

#### ③チャー燃焼促進実験

本研究で実施した①高温空気による着火燃焼実験、②室温空気による着火燃焼実験にて、チャー燃焼部が長く伸びた状態で燃焼が継続する様子が観察された。本研究では、チャー燃焼を促進しチャー燃焼部の短縮を図るため、チャー燃焼部に 2 次空気を供給し、

2次空気の燃焼挙動への影響を調べた。図5に、本研究で使用した燃焼実験装置（チャー燃焼促進）の燃焼部概略を示す。2次空気供給部以外は図4と同様の装置を用いた。2次空気供給口はブリケット供給管上端から35.5mmの高さの4方向からブリケット中心へ向けて供給した。密度1100kg/m<sup>3</sup>のブリケットについて、ブリケット内管空気流量を1NL/min、1次空気流量を~370NL/min、2次空気流量を2次空気噴出口1つあたり~35NL/minとして実験を行った。

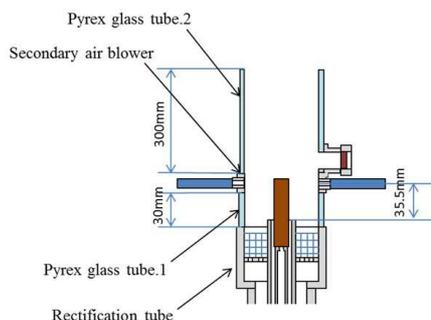


図5. チャー燃焼促進実験装置概略

#### 4. 研究成果

##### (1) バイオマスブリケット製造条件

円柱および円筒ブリケットの製造条件（温度、圧力、初期水分率）を確認した。

##### (2) バイオマスブリケットの熱拡散率へのブリケット密度の影響

水分率10%、密度を900、1100、1300kg/m<sup>3</sup>としたブリケット、および同条件で製造後電気炉にて加熱し水分を除いたブリケット（絶乾）について、熱拡散率の測定を行なった。図6に実験結果を示す。水分率10%のブリケットでは、T<sub>2</sub>熱電対温度が100℃前後で大きく熱拡散率が低下している。これはブリケット中の水分が蒸発する際に熱量を奪われ、内部に熱が伝わりにくくなったためと考えられる。絶乾ブリケットと比較すると、加熱初期から熱拡散率が低い値となっており、水分の影響が現れていることがわかる。また、水分率10%のブリケットでは全ての密度において熱拡散率が急低下ののちに徐々に大きくなっているが、密度の違いによる影響よりも水分の影響が大きいと考えられる。

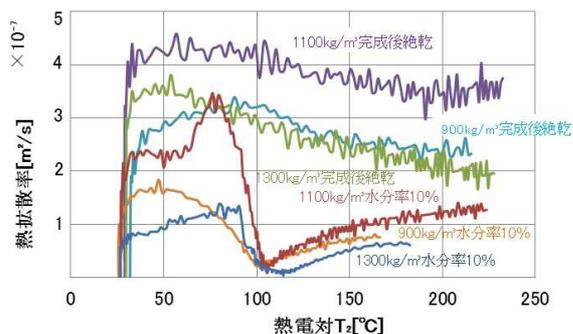


図6. ブリケットの熱拡散率の変化

水分の影響の無い状態におけるブリケット密度の熱拡散率への影響を調べるため、絶乾ブリケットについて熱拡散率を調べた。図7に各ブリケット密度、温度における熱拡散率の測定結果を示す。各ブリケット密度について6回以上ずつ実験を行い、平均値および最大値、最小値をあわせて示した。各密度ともに熱拡散率は温度の上昇とともにわずかに低下する。平均熱拡散率を比較すると、低密度（900kg/m<sup>3</sup>）でわずかに小さくなる傾向が見られるが、1100、1300kg/m<sup>3</sup>ではほぼ同様であり、密度による差は大きくないことがわかる。以上の結果より、熱拡散率への密度そのものの影響は大きくなく、水分率の影響が大きいことがわかった。

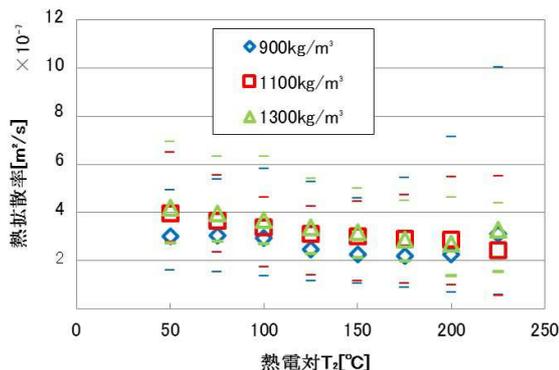


図7. 絶乾ブリケットの熱拡散率の変化

##### (3) 高温空気着火による燃焼挙動

ブリケットの炉内への供給速度を2、4、6mm/min一定とし、端面燃焼が可能かを調べた。図8に、密度1100kg/m<sup>3</sup>、φ30mm円柱ブリケットの質量減少速度の時間変化を示す。

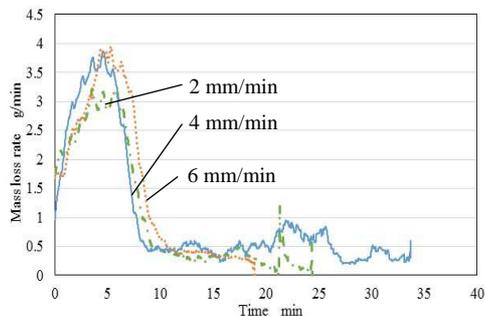


図8. 円柱ブリケットの質量減少速度  
(密度1100kg/m<sup>3</sup>、φ30mm)

高温空気着火を行なった場合、円柱ブリケットでは炉内への燃料供給速度に拘わらず、火格子燃焼のようにブリケット外周全体を火炎が覆うような燃焼状態が観察され、質量減少速度の変動が大きくなった。

図9に、密度1100kg/m<sup>3</sup>、φ35mm×φ18mm×120mm円筒ブリケットの場合の質量減少速度の時間変化を示す。図9より、燃料供給速度4mm/minにおいて、ほぼ質量減少速度が一定で燃焼する条件のあることがわかる。密度1300kg/m<sup>3</sup>のブリケットについても同様に、質量減少速度がほぼ一定で燃焼する様子が

観察された。

質量減少速度がほぼ一定で燃焼する際に、図 10 に示すような特徴的な燃焼挙動が観察された。すなわち、ブリケット外周下方およびブリケット上端に火炎が形成され、ブリケット外周火炎の上方には赤熱して表面燃焼

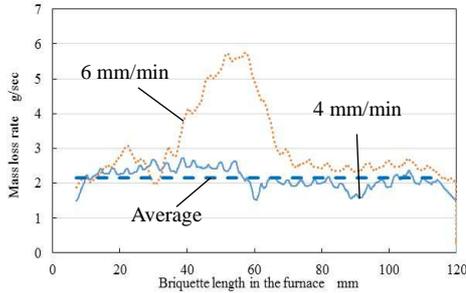


図 9. 円筒ブリケットの質量減少速度 (密度 1100kg/m<sup>3</sup>、φ 35mm × φ 18mm × 120mm)

するチャー燃焼部が長く伸びた様子が観察された。ブリケット下方 (ブリケット供給口付近) で熱分解されたガスが外周部で火炎を形成する一方、内周側の熱分解ガスは酸素が供給されるブリケット先端で火炎を形成すると考えられる。また熱分解速度に比べチャー燃焼速度は遅いため、ブリケット外周部に長く伸びたチャー燃焼部が形成されるものと考えられる。

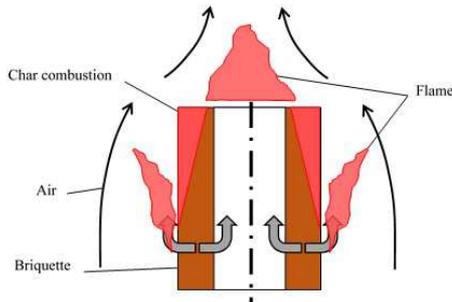


図 10. 円筒ブリケットの端面燃焼概念

φ 40mm × φ 26.5mm × 60mm ブリケットにて実験を行なったところ、質量減少速度が一定となる燃焼は観察されなかった。ブリケットの炉内への供給速度と質量減少速度の関係を調べた結果、ブリケットの冷却不足に起因すると見られる未供給ブリケットの予熱が大きく影響している可能性が示唆された。このため、高温空気を用いたブリケットの着火方法を、室温空气中で着火部のみ電熱線加熱する方法へ変更することとした。

#### (4) 室温空气中着火の場合の燃焼挙動

実験に先立ち、まず室温空气中での着火条件を試行し、安定的に着火できる条件を確認した。また、円筒ブリケット内面側に放出された熱分解ガスが未燃ブリケット側へ下降して凝縮、ブリケットに含浸され、ブリケット変形の要因となっていたため、円筒ブリケット内管にわずかに空気を供給して熱分解ガスを全て燃焼に供するよう変更した。燃焼

挙動を確認するため、ブリケット内管へは 2L/min の室温空気を供給した。

室温空气中着火にて燃焼実験を行ったところ、高温空気による着火と同様、質量減少速度がほぼ一定となり、図 10 に示したのと同様の燃焼挙動が観察された。図 11 に、密度 1300kg/m<sup>3</sup>、φ 35mm × φ 18mm × 90mm ブリケットの質量減少速度の時間変化を示す。ブリケット外周側空気流量を変化させた場合の結果を示したが、それぞれの空気流量において質量減少速度がほぼ一定となる期間が見られることがわかる。これより、着火時の高温空気による予熱がない条件においても質量減少速度がほぼ一定となる端面燃焼を実現できる条件のあることがわかる。

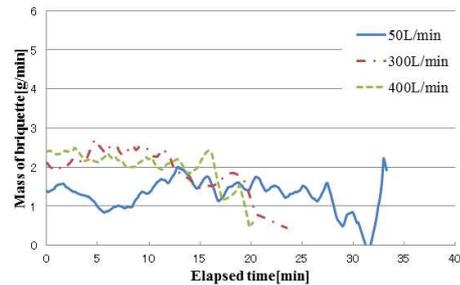


図 11. 円筒ブリケットの質量減少速度 (密度 1300kg/m<sup>3</sup>、φ 35mm × φ 18mm × 90mm)

密度 1100kg/m<sup>3</sup>、1300kg/m<sup>3</sup> の場合における質量減少速度と燃焼効率へのブリケット外周空気流量の影響を、図 12 および図 13 にそれぞれ示す。両条件において、空気流量 400L/min において火炎が吹き消え、燃焼が継続しないことが観察された。

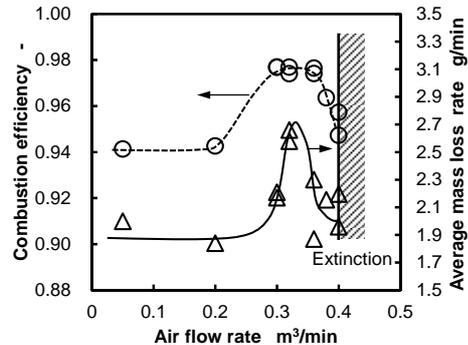


図 12. 質量減少速度および燃焼効率 (1100kg/m<sup>3</sup>)

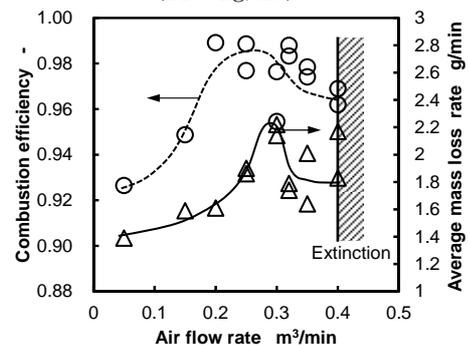


図 13. 質量減少速度および燃焼効率 (1300kg/m<sup>3</sup>)

図 12 および図 13 より、質量減少速度および燃焼効率は空気流量が小さい場合および大きい場合に小さく、中間の空気流量にピークを持つことがわかる。空気流量が小さい場合には酸素不足のため燃焼効率および質量減少速度が低下し、空気流量が大きい場合にはブリケット外周に形成された火炎が不安定になるためと考えられる。両条件ともに燃焼効率の高い範囲で空気流量を変化させることにより、比較的高い燃焼効率を保ちながら燃焼負荷を変更できることが窺える。密度の影響を見ると、密度の低い 1100kg/m<sup>3</sup> (図 12)の方が密度の高い 1300kg/m<sup>3</sup> (図 13)よりも質量減少速度は大きくなることがわかった。

#### (5) チャー燃焼の促進

長く伸びるチャー燃焼部の燃焼を促進するため、密度 1100kg/m<sup>3</sup> のブリケットについてチャー燃焼部に 2 次空気を供給した。2 次空気流量とブリケット高さ (ブリケット供給管上端からチャー燃焼部上端までの長さ) との関係を図 14 に、チャー燃焼部表面最高温度 (着火 12 min 後) との関係を図 15 に、それぞれ示す。図 14 より、2 次空気流量を大きくすることでブリケット高さ、すなわちチャー燃焼部長さが短くなることがわかる。とくに 2 次空気を 0.015 m<sup>3</sup>/min 程度以上供給することでチャー燃焼部長さを短く抑えられることがわかる。また図 15 より、2 次空気流量が大きくなるとチャー燃焼部表面最高温度が高くなることがわかる。これらの結果から、チャー燃焼部に 2 次空気を供給することでチャー燃焼が促進されたと考えられる。

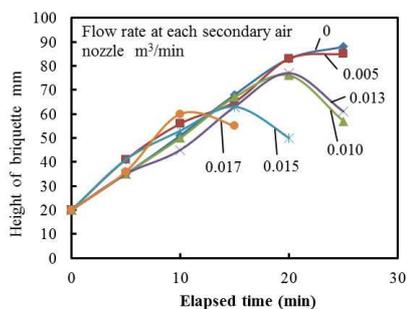


図 14. 2 次空気流量のブリケット高さへの影響 (密度 1100kg/m<sup>3</sup>、内管空気 1L/min、外周空気 300NL/min)

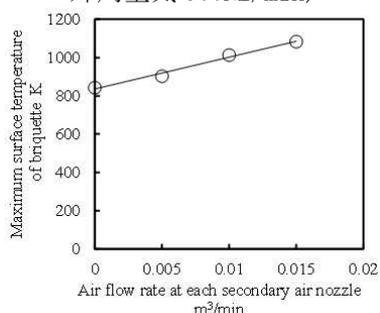


図 15. 2 次空気流量のブリケット表面最高温度への影響 (密度 1100kg/m<sup>3</sup>、内管空気 1L/min、外周空気 300NL/min)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) 伊東弘行, 高密度バイオマスブリケット燃焼挙動へのブリケットサイズの影響, スマートプロセス学会誌, Vol.5, No.2, pp.129-135 (2016). (査読有り)

(2) T.Nakahara, H. Yan, H. Ito, O. Fujita, Study on One-dimensional Steady Combustion of Highly Desified Biomass Briquette (Bio-coke) in Air Flow, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.35, Issue 2, pp.2415-2422(2015). (査読有り)

[学会発表] (計 6 件)

(1) H. Ito, A.Sekiguchi, M.Wakebe, Influence of air flow rate on the end face combustion behavior of highly densified cylindrical briquette, Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2017.10.28, 沖縄) (予定).

(2) 伊東弘行, 井出伸晃, 白井和, 高密度円筒バイオマスブリケット端面燃焼挙動への二次空気供給の影響, 第 27 回 環境工学総合シンポジウム 2017, (2017.7.12, 浜松) (予定).

(3) 伊東弘行, 円柱形状高密度バイオマスブリケット燃焼挙動へのブリケットサイズの影響, 熱工学コンファレンス 2016, (2016.10.22, 愛媛大学).

(4) H. Ito, A.Furusawa, Research on steady state combustion of highly densified cylindrical biomass briquette, 36th International Symposium on Combustion, (2016.7.31, Seoul, Korea).

(5) 古澤淳史, 伊東弘行, バイオマスブリケットの端面燃焼挙動に及ぼすブリケット形状の影響, 熱工学コンファレンス 2015, (2015.10.24, 大阪大学).

(6) 伊東弘行, 多田尚樹, 松本圭志, 木質バイオマスブリケット加熱における熱拡散への密度および水分の影響, 熱工学コンファレンス 2014, (2014.11.8, 芝浦工業大学)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊東 弘行 (ITO HIROYUKI)  
神奈川大学・工学部・准教授  
研究者番号: 30372270

##### (2) 連携研究者

藤田 修 (FUJITA OSAMU)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10183930